氣候變遷的調適路徑

童慶斌[1] 曹榮軒[2] 林嘉佑[3] 劉子明[4]*

摘要

近年來氣候變遷議題備受矚目，然而面對氣候變遷之威脅，各級單位與執行調適計畫之專業團隊往往不知如何才是正確之氣候變遷調適規劃。在氣候變遷與社會經濟發展之不確定性下，也缺乏系統方法與工具去擬定合適之調適方案。為此，本研究探討氣候變遷不確定性下之調適路徑擬定方法，並參考國際間針對氣候變遷所制定之調適步驟流程，說明氣候變遷調適決策六大步驟，從問題界定與目標設定、評估與分析現況風險、評估與分析未來風險、界定與評估調適選項、規劃與執行調適路徑、到監測與修正調適路徑等六大步驟。同時，提供以氣候變遷調適決策六大步驟為主軸之支援調適決策工具 AdaptCAB，做為協助調適計畫之檢核工具，提供每一步驟之細節、使用工具與產出，以作為氣候變遷調適決策之參考。

關鍵詞：永續發展、氣候變遷、調適策略、決策支援、標準流程。

前言

近年來極端天氣帶來之嚴重衝擊，使大家逐漸體認到要面對未來氣候變遷可能帶來更大之影響，必須即早與實質推動調適方案。然而，無論是氣候的變化或是社會經濟發展，都具有相當之不確定性。如何面對氣候變遷以及社會經濟發展的不確定性，考量跨領域之間的互相關聯，以擬定適當之調適方案，則需要有系統性的思考與方法，以具有強健性 (robust) 以及彈性 (flexible) 的調適路徑來逐步完成調適目標。在擬定調適計畫的過程中，需要一個共同的溝通平台呈現，無論是政府、學術研究單位、企業法人或是一般社會大眾都能夠在一定的共識下，利用相同的工具，讓利害相關者皆能參與決策。調適路徑即是在這樣的需求下所建立的工具，其概念如同捷運路線圖，在使用者了解了出發站以及目的地之後，便可以自由地選擇連接兩個點之間的路線，同時也需要配合既有路線在某些中途站進行轉乘的動作，並決定最後到達終點的路徑。如果將終點當程面對氣候變遷下所想要達成的目標，則整個乘車轉乘的過程就可

1 台灣大學生物環境系統工程學系教授 cptung@ntu.edu.tw。
2 台灣大學生物環境系統工程學系博士候選人 junghsuan@gmail.com。
3 台灣大學生物環境系統工程學系博士候選人 chiayu0119@gmail.com。
4 台灣大學生物環境系統工程學系博士後研究員 tedliu13@gmail.com。
* 通訊作者電子信箱：tedliu13@gmail.com；電話：02-33663489。

以用調適路徑來呈現。以下將介紹調適路徑之觀念，並說明系統性之調適決策步驟，同時說明調適決策過程中，如何利用工具來協助調適決策。

研究方法

(一)氣候變遷調適路徑

氣候變遷調適路徑之觀念來自於 Haasnoot (2012)，主要藉由模擬各種不同的情境配合不同的調適選項，得到系統的表現，並將系統的表現分為可以接受、中等和不可接受的狀態，當某個調適選項讓系統表現達到不可接受狀態的時間點，就可稱為系統的臨界點 (tipping point)，從開始評估的起點到達臨界點的時間，就是該調適選項的有效期 (sell-by date)。將這樣的觀念進一步延伸，當某一個調適選項到達臨界點，就可以視為該調適路徑上的轉乘點，代表該路徑已經沒有辦法讓系統維持可接受的狀態到達終點，所以必須要選擇其他的路徑。當把所有可能的調適路徑描繪出來後，可以更進一步地就每一條可行的路徑進行評估，這其中包括所花費的經費以及造成其他領域的副作用，讓最後選擇調適路徑的決策者或是利害相關者獲得足夠的資訊，選擇其中一條調適路徑做為面對氣候變遷調適未來的方針。

以圖 1 為例，ABC 三條線代表不同調適策略所得到的負荷，水平線 D 代表系統的承載，若是承載大於負荷表示系統處於一個不可接受的狀態，策略 C 在第一個星號的時間點之後就處於不可接受，故策略 C 有效期的長條長度非常短，若要使系統離開不可接受的狀態，則需在第一個星號進行轉乘的動作，可以選擇轉乘的路徑包括策略 B 和策略 A。同理，策略 B 的有效期可以到第二個星號的時間點，須在該點進行轉乘至策略 A 以確保系統的狀態，而策略 A 則始終都可以讓系統保持可接受的狀態。

如果一開始就選擇策略 A，表示一開始就認定預測的未來可能會發生，因此策略 A 可以說是較為強健的策略，然而必須面對的風險則為如果未來沒有預測那麼嚴峻，強健措施的花費可能成為浪費；一開始選擇策略 B 或 C 都是屬於較為彈性的調適路徑，原因在於未來具有極大之不確定性，可以選擇微幅增加承載力的方式因應短期內之威脅，一旦未來之威脅趨勢確認，則可以依照原訂之調適路徑執行，再加入其他方案；一旦未來之威脅不如預測之風險，則可以修正原有之調適路徑。無論是強健的調適路徑或是彈性的調適路徑，都各具優缺點，唯有將所有可行之調適路徑列出，比較不同路徑之花費、效用、附加影響等因素，透過利害關係者會議討論，來擬定未來該走之調適路徑才能客觀訂出未來調適方案與路徑。

在氣候變遷調適路徑的建置中，需要一步步將所需要的元素建構完成。首先是縱軸與橫軸的定義問題，在縱軸的設計上多是以調適策略為主 (Haasnoot，2013)，可以清楚的讓後續的決策者或是討論決策的利害相關者了解有那些可行的調適策略。此

外，也可以行動方案作為調適路徑圖的縱軸，比起策略，調適行動方案更能夠明確的提供該做什麼的訊息，但是在目前的調適路徑相關研究上，常常會出現策略與行動方案兩者交互出現的情形，定義不夠明確容易造成實際執行上的混淆 (Haasnoot, 2012;Siebentritt, 2014)。在橫軸的設計上，則可以採用時間 (Haasnoot, 2012;Siebentritt, 2014)或是氣候相關的參數 (Werners, 2013;Maru, 2014)。以時間作為橫軸的優點在於可以明確對應轉乘的時間，但是在有關於氣候變遷模擬得到的結果，多是以未來一段時間的平均情形來呈現，縱使氣候變遷模擬有提供逐年的資料，但是這些資料在這樣的時間尺度下有極高的不確定性，這是在以時間作為橫軸時會面臨到的最大挑戰。若是以氣候相關參數作為橫軸，則是以可以描述系統風險最主要的狀態變數，如海平面上升高度、洪水回歸頻率、熱浪發生頻率、供水系統承載力，此類參數型的橫軸利於描述系統的狀態，可與監測系統結合，在調適路徑的規劃上達到預警以及修正的效果。表 1 將上述縱軸與橫軸的狀況進行成對比較，並舉出現有的案例進行分析與說明。

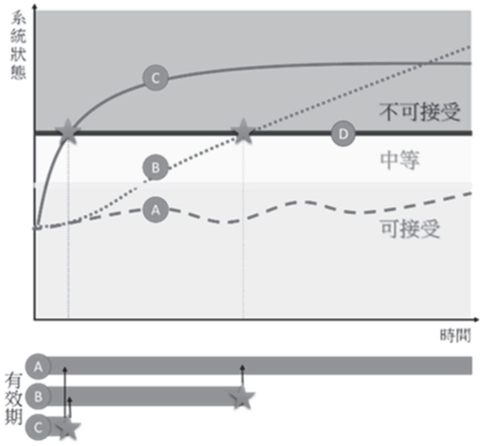

圖 1. 系統狀態與策略轉乘示意圖

表 1 調適路徑的分類

調適路徑類型	說明
策略-時間型	參考圖 2 以及圖 3，可作為大方向目標時使用，但是後續實際執行時仍需要進一步的細節排程
策略-參數型	參考圖 4，以淹水、熱浪以及乾旱的發生頻率作為橫軸風險程度的表示，定義現況的風險以及目標年的風險改變情形，較容易與監測預警系統結合
行動方案-時間型	參考圖 5，可提供非常詳細的選項轉換，但是需要解決在呈現所遭遇過於複雜的問題，如果執行的行動方案過多時，排列組合後的結果會非常複雜，在利害相關者討論時會有呈現上的困難
行動方案-參數型	在建置的過程相對複雜，必須了解每一個行動方案所對應改變的氣候參數情形，但是這樣的組合在後續結合監測系統上是最為詳細便於使用

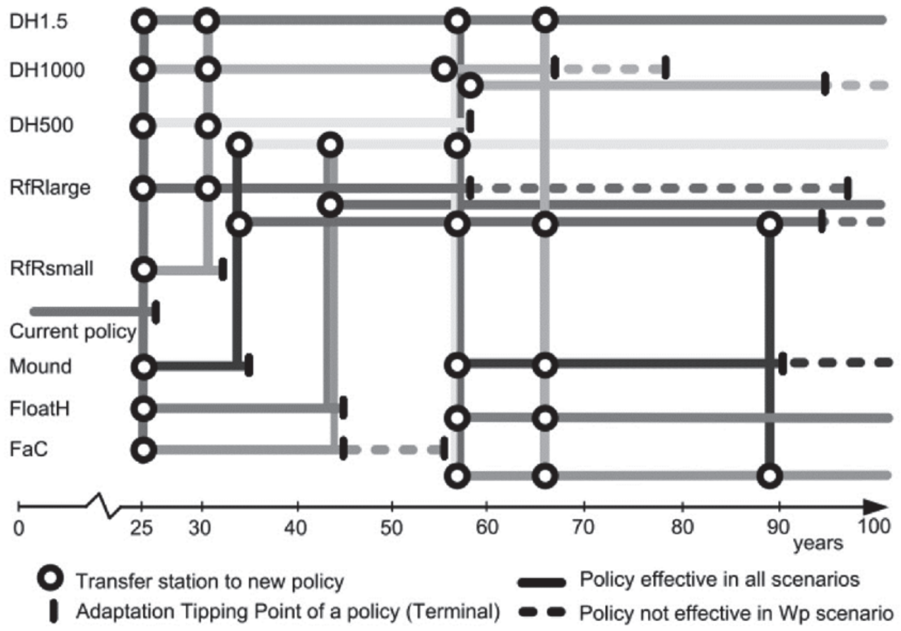

圖 2. 策略–時間型調適路徑 (Haasnoot, 2012)

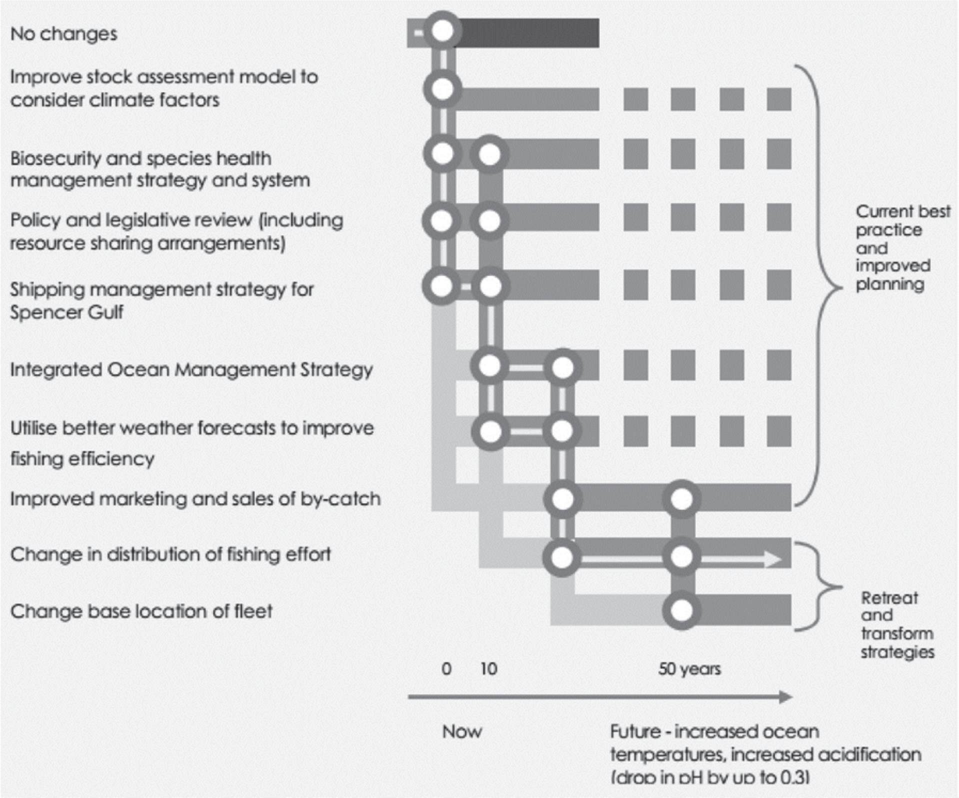

圖 3. 策略–時間型調適路徑 (Siebentritt, 2014)

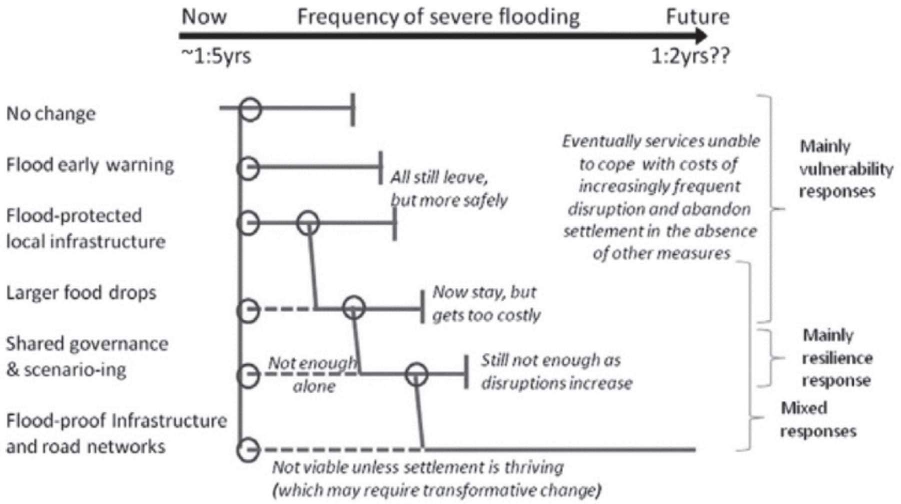

圖 4. 策略–參數型調適路徑(Maru, 2014)

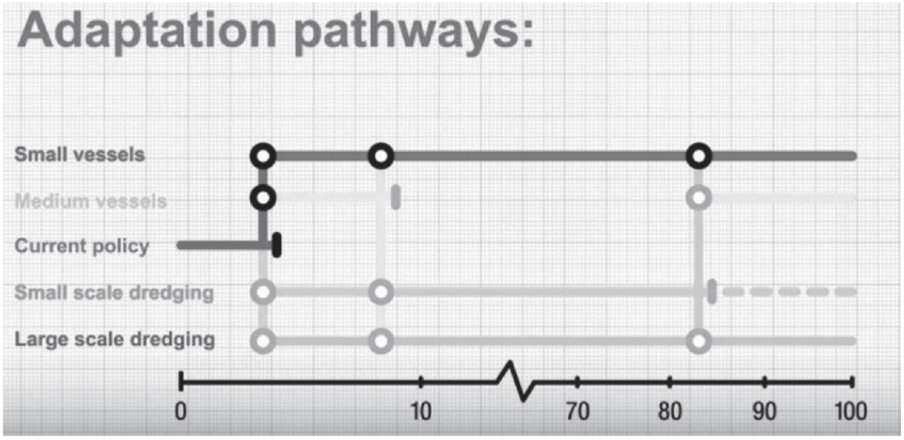

圖 5. 行動方案–時間型調適路徑 (Haasnoot, 2013)

(二)氣候變遷支援調適決策工具

調適路徑之擬訂其實已經是在調適對象完成問題界定，以及現況與未來之評估，了解氣候變遷之風險來源之後，去界定可行調適選項，然後才去擬定調適路徑。因此，要訂定完善之氣候變遷調適路徑，仍必須遵循系統性之氣候變遷調步驟與流程。在氣候變遷的調適步驟與流程上，國際上有許多已發展之決策步驟可以參考，如：聯合國氣候變遷調適政策綱領 (UNDP APF) 、英國氣候衝擊計畫的調適精靈 (UKCIP Adaptation Wizard)，以及歐洲氣候調適平台的調適支援工具 (CLIMATE-ADAPT Adaptation Support Tool) 等。上述機構之調適決策步驟，其內容雖然不盡相同，然而對於氣候變遷調適的基本精神其實是一致的。以英國氣候衝擊計畫的調適精靈為例，

共包含了：開始、現況氣候脆弱度、未來氣候脆弱度、調適選項、監測與回顧五項程序，由尋找氣候變遷可能遭遇之問題出發，並依據評估現況與未來可能面臨之風險，進而擬定可能之調適選項，並針對調適選項的執行進行與事後的回顧檢討。

本研究參考上述各機構之調適決策步驟，並參考國內氣候變遷地方調適計畫，歸納彙整出氣候變遷調適決策六大步驟，包括：(一) 界定問題與設定目標；(二) 評估與分析現況風險；(三) 評估與分析未來風險；(四) 界定與評估調適選項；(五) 規劃與執行調適路徑；(六) 監測與修正調適路徑。現階段本研究已針對上述六大步驟的內容進行定義外，並針對各步驟所包含的次步驟、細部工作項目進行分項，亦對流程中所需使用到的資料、工具以及各流程對應之產出設計了分析評估資料的檢核表，以提供上述六大調適流程的使用者以及檢核者作為確認調適流程與資料、工具產出完整性之檢核用途。此外，為進一步協助使用者在執行調適決策規劃的過程中能夠自我檢核，並依循前述氣候變遷調適六大步驟內的各項次步驟與工作項目，瞭解整個調適計畫可能出現之缺漏，進而滾動式修正調適計畫，使整體調適流程趨於完整，本研究以氣候變遷調適六大步驟為基礎，發展了適合於跨領域與各領域調適行動政策決策工具 AdaptCAB (Adaptation Capacity Builder)。為方便多數使用者皆可執行 AdaptCAB，本研究選擇以微軟的 Office Excel 作為檢核工具的建置平台，並放置於 TaiCCAT-VA (科技部計畫：氣候變遷調適科技整合研究計畫-跨領域脆弱度評估與回復力建構科技發展計畫 (III) 知識平台網站提供下載。

在 AdaptCAB 中，除了提供檢核功能外，更具備了說明與介紹調適決策步驟的附加價值。當使用者利用支援調適決策工具逐項進行檢核的同時，AdaptCAB 將依據使用者之對於各項目之填表情形，同步計算各個步驟的完成率與整體計畫的完成度，並藉由數字搭配長條圖的可視化方式呈現調適檢核之結果。針對未達成或是執行不完整之工作項目，程式亦將產生記錄報表，並整理出後續執行計畫可能遭遇的問題為何，以及現行可解決的辦法為何，使得使用者在自我檢核之餘更能理解問題所在，進而面對問題、解決問題。現階段的結果報表採用條列的方式來呈現，未來希望朝向產生出書面報告的形式發展，將各項條列結果彙整成文章形式，以方便使用者閱讀。

三、支援調適決策工具應用

本研究以氣候變遷下水資源與糧食安全之跨領域脆弱度與回復力評估研究 (科技部，2015) 為例，根據其評估報告之內容進行支援調適決策工具之操作與說明。由於該研究為 TaiCCAT-VA 的示範計畫之一，由計畫團隊來進行調適規劃，故在 AdaptCAB 的操作上將選擇以執行者的角度來進行檢核。表 2 為該研究對應支援調適決策六大步驟中的第一步驟次步驟一之執行狀況 (童慶斌等，2015)，可看出所有工作項目皆有達成，唯獨在組成專業團隊部分並未透過公開招標或遴選的方式，因此在此項上並未勾

選 (圖 6)，則該工作項目之達成律則會因為缺乏完整性而無法到達 100 %。圖 7 最下方之總體完成率由於是整合了六大步驟之綜合評分結果，其得分將隨著自我評量的進行而逐漸累計。在後續的自我評量中，使用者將依照步驟一至步驟六的各項工作項目逐一進行填選，並產出最終之評量結果。

表 2. 操作案例之第一步驟次步驟一之執行狀況 (童慶斌等，2015)

步驟	次步驟	工作項目	對應作為
1 界定問題與設定目標	氣候變遷調適工作團隊之組成	確立主政部門與承辦人	包含中央政府與地方政府，主要為管理水權與管理水資源調度之單位。
		組成專業團隊	由中央大學李明旭教授、台灣大學童慶斌教授、與中興大學石棟鑫助理教授，組成專業團隊負責執行計畫。
		組成參與的利害關係者	依據不同用水需求者，分為農業用水、民生用水、工業用水者，民間管理水資源單位以及民間關心氣候變遷的 NGO 單位組成。

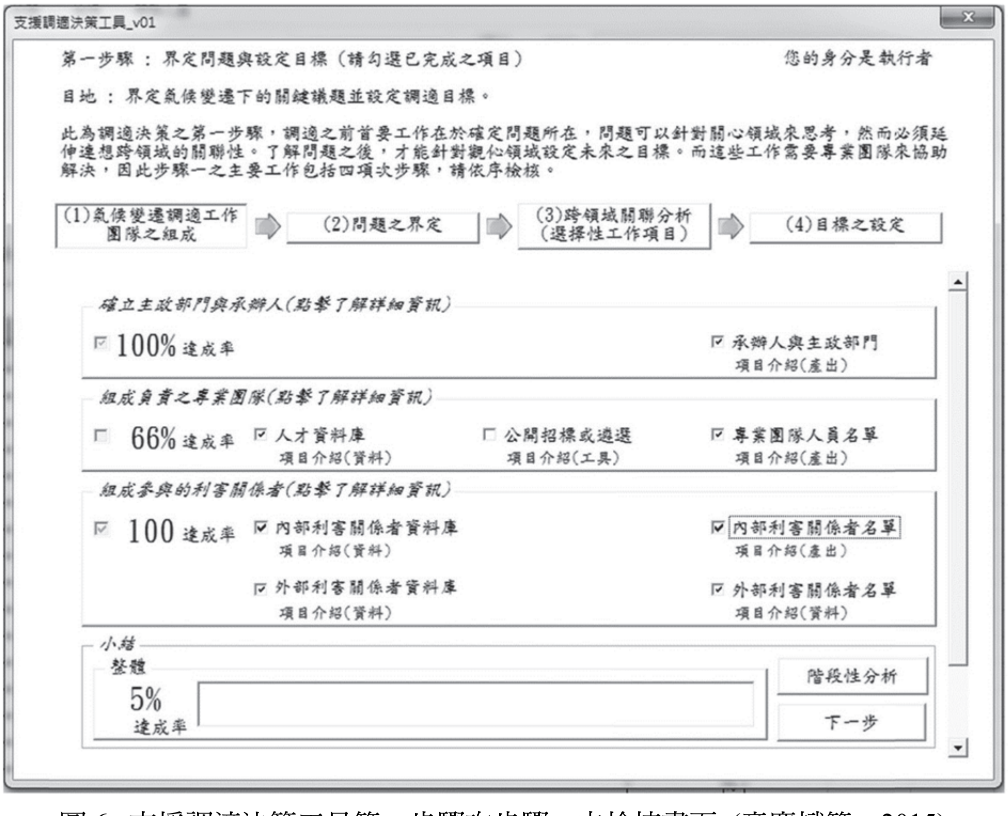

圖 6. 支援調適決策工具第一步驟次步驟一之檢核畫面 (童慶斌等，2015)

圖 7 為該研究之最終檢核結果 (童慶斌等，2015)，由於該研究現階段僅進行至第四步驟之次步驟一，並未包含第五與第六步驟，可看出最終的檢核結果中最後兩大步驟的內容仍為空缺狀態。此外第四步驟的次步驟一中原有兩項工作項目，分別為「蒐集當地智慧調適選項」與「彙整調適選項」，然而該研究並未蒐集當地智慧調適選項，因此在後續的彙整調適選項部分也會缺乏相關資料，使得該次步驟的完成度偏低。由圖 7 可看出示範計畫在第二與第三步驟的執行相當完善，而第一步驟除了跨領域的部分未執行外，也有接近八成的完成度，因此即便自我檢核僅進行至第四步驟，該示範案例的完成度已達 61%。目前 AdaptCAB 暫時將各項檢核項目佔所有工作項目的分配權重設為均等，後續則考慮針對各個工作項目予以不同之權重比例，以凸顯特定工作項目在支援調適決策工具中的重要程度。

圖 8 為 AdaptCAB 針對調適範例所產出之問題分析頁面 (童慶斌等，2015)，於前述檢核過程中，AdaptCAB 將未達成的檢核項目記錄下來，並以表格形式呈現，可以藉由該表格了解該檢核範例中所遭受之困難為何，並且根據檢核項目中的資料、工具、產出等項目予以分類，以利使用者在進行問題分析之後，能夠更有效率的解決問題。現階段 AdaptCAB 僅先將未達成特定工作項目可能遭遇之困難列出，往後亦希望提供解決方法，或是提供使用者解決問題之相關資訊。

結論與建議

面對氣候變遷與未來社會經濟發展之不確定性，利用氣候變遷調適路徑圖，劃出未來強健性的調適路徑，或是較為彈性的調適路徑，可以做為擬定調適路徑之系統方式與工具。調適路徑之理論雖已完整，然而仍缺乏明確之流程以及適切之工具，以協助利害關係者在調適會議上能清楚了解如何擬定調適路徑圖以及決定未來調適路徑。

此外，調適路徑之擬定也必須建立在系統性的調適擬定步驟之上。本研究參考國內外氣候變遷調適流程之內涵，建立氣候變遷支援決策調適六大步驟，並針對各項步驟所需之資料、工具與產出進行說明。為方便調適行動之執行者與檢核者進行調適過程之檢核，本研究設計開發了 AdaptCAB 工具，適合於跨領域與各領域調適行動政策決策之說明與檢核。藉由直覺的操作方式，幫助使用者能夠循序認識與檢核調適行動。

現階段提出之調適步驟，細部工作項目、資料或工具需求標準以及規範，仍有許多尚待討論與補充之處。此外，部分工作項目的設計是否可能會導致特定調適領域在執行上會產生困難，仍須藉由其他領域的使用者進行實際操作後方能確認。因此，在支援調適決策流程的修正與補充部分，仍有待各界進行試用並給予意見回饋，以讓調適六大步驟與工具更加完整。

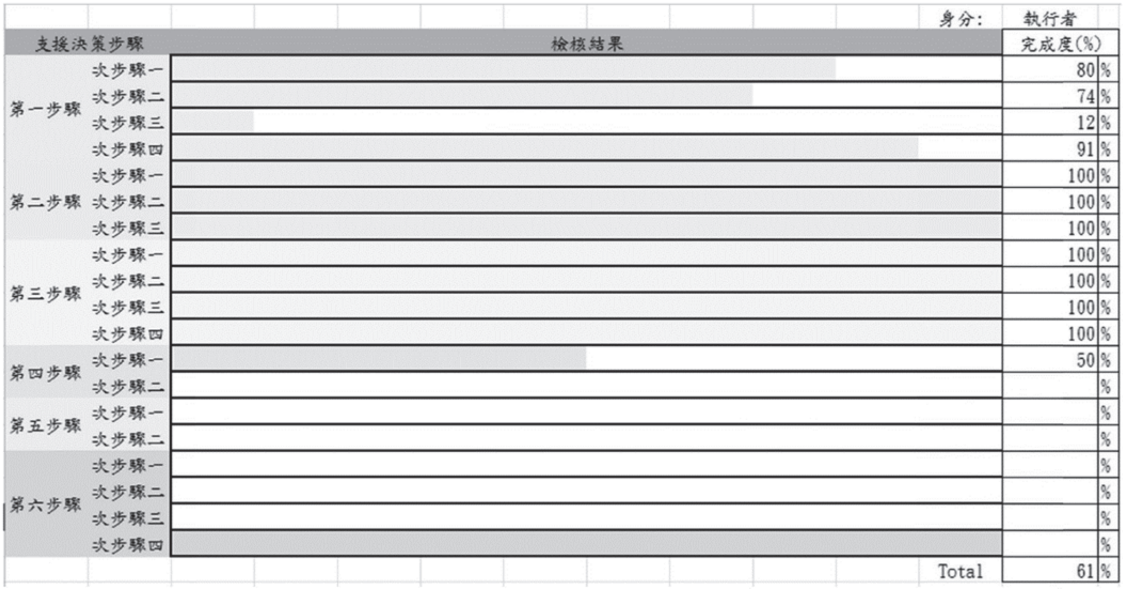

圖 7. 支援調適決策工具檢核成果 (童慶斌等, 2015)

項目	步驟	未達成項目	類型	未達成可能遭遇之困難
1	一	公開招標或遴選	工具	可透過政府人才資料庫搜尋具備專業能力之團隊
2	一	地方訪談、電話或網路民調等方法	工具	無法貼近民意，使決策與議題互無接軌
3	一	在地關注議題	產出	無法貼近民意，使決策與議題互無接軌
4	一	調適啟動會議	工具	解此了解關鍵議題之急迫性
5	一	跨領域分析工具	工具	需先界定關鍵議題之跨領域影響範圍
6	一	關鍵議題跨領域影響領域與因子	產出	無法界定關鍵議題之影響領域及各領域間關聯性
7	一	專業團隊修正組成名單	產出	專業團隊成員缺乏跨領域調適規劃能力
8	一	利害關係者修正組成名單	產出	缺乏考量跨領域之利害關係者意見
9	四	對應風險成因之調適選項列表	資料	建議由風險成因列表配合調適選項列表，以找出可行之調適選項
10	四	彙整之調適選項	產出	應彙整可行之調適選項
11	四	對應風險成因之當地智慧調適選項列表	資料	應考量當地智慧之調適選項

圖 8. 支援調適決策工具問題分析 (童慶斌等, 2015)

參考文獻

童慶斌、林李耀、蘇慧貞、盧虎生、林幸助、李明旭。2015。氣候變遷調適科技整合研究計畫(III) -跨領域脆弱度評估與回復力建構科技發展計畫(III)期中報告。行政院科技部補助專題研究計畫。

Burton, I., and Development Programme United Nations. 2005. Adaptation policy frameworks for climate change: developing strategies, policies and measures (p.258). B. Lim (Ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

CLIMATE-ADAPT Adaptation Support Tool website, http://climate-adapt.eea.europa.eu/adaptation-support-tool.

Haasnoot, M., Kwakkel, J.H., Walker, W.E., and Ter, M.J. 2013. Dynamic Adaptive Policy Pathways: A New Method for Crafting Robust Decisions for a Deeply Uncertain World. Global Environmental Change. 23(2):485–498.

Haasnoot, M., Middelkoop, H., Offermans, A., Van Beek, E., and Van Deursen, W.P.A. 2012. Exploring pathways for sustainable water management in river deltas in a changing environment. Clim Chang.115(3–4):795–819.

Haasnoot, M., Van Deursen, W. P. A., Guillaume, J. H. A., Kwakkel, J. H., Van Beek, E., and Middelkoop, H.2014. Fit for purpose? Building and evaluating a fast, integrated model for exploring water policy pathways. Environ Model Softw.60:99–120.

Siebentritt, M., Halsey, N., and Stafford, S. M. 2014. Regional Climate Change Adaptation Plan for the Eyre Peninsula. Report prepared for the Eyre Peninsula Integrated Climate Change Agreement Committee.

TaiCCAT-VA website, http://sdl.ae.ntu.edu.tw/TaiCCAT_VA/UKCIP. website, http://www.ukcip.org.uk/.

Werners, S.E., Pfenninger, S., Van Slobbe, E., Haasnoot, M., Kwakkel, J., and Swart, R.J.2013.Thresholds, tipping and turning points for sustainability under climate change. Current Opinion in Environmental Sustainability.5:334–340.

Y. T. Maru, Stafford, S. M., A. Sparrow, P. F. Pinhoc, andO. P. Dube.2014. A linked resilience and vulnerability framework for adaptation pathways in remote disadvantaged communities. Global Environmental Change, 28 (2014), 337–350.

Adaptation Pathways to Climate Change

Ching-Pin Tung[1], Jung-Hsuan Tsao[2], Chia-Yu Lin[3], and Tzu-Ming Liu[4]*

Abstract

In recent years, issue of climate change was highly focused. But facing of the threat of climate change, the government agencies and the adaptation planning teams often do not know how to make the adaptation plan correctly. Under the uncertainty of climate change and society development, it is also lack of systematic method and tool to help making proper adaptation plan. Therefore, this study brought the methodology of adaptation pathways under climate change uncertainty and developed the six steps of making climate change adaptation strategies, from problem definition and goal setting, current risk assessment and analysis, future risk assessment and analysis, identifying and evaluating adaptation options, planning and implementing adaptation pathway, and monitoring and adjusting adaptation pathway. Furthermore, the decision support tool, AdaptCAB, which is following the six steps of making climate change adaptation strategies, was brought out to help checking adaptation plans. It also provides the details of each step, the use of tools and outputs of the adaptation six steps as a reference of making climate change adaptation plan.

Keywords: Sustainable Development, Climate Change, Adaptation Strategy, Decision Support, Standard Procedure.

---

1 Department of Bioenvironmental Systems Engineering, National Taiwan University, cptung@ntu.edu.tw.

2 Department of Bioenvironmental Systems Engineering, National Taiwan University, junghsuan@gmail.com.

3 Department of Bioenvironmental Systems Engineering, National Taiwan University,chiayu0119@gmail.com.

4 Department of Bioenvironmental Systems Engineering, National Taiwan University, tedliu13@gmail.com.

* Corresponding Author, Email:tedliu13@gmail.com; Tel: 02-33663489.